

МОДЕЛЬ-ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

НАБОКОВ Артем Сергеевич, аспирант; e-mail: t3man8@yandex.ru

БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры; e-mail: bulavskiy@pgups.ru

МАРКОВ Дмитрий Спиридонович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: MDS1945@yandex.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», Санкт-Петербург

В статье сформирована модель-описание этапа проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики как основа последующего построения имитационной модели для анализа, прогнозирования результатов и повышения эффективности реализации проектов. В рамках разработки модель-описания определена цель моделирования, сформулированы предъявляемые функциональные требования, а также границы и принятые допущения. Выполнен системный анализ этапа проектирования, декомпозиция этапа на основные процессы и проектные работы, выявлены его цели и ключевые показатели эффективности проектной деятельности, а также основные проблемы, связанные с длительностью выполнения проектов и качеством технической документации. На основе метода причинно-следственного анализа построена диаграмма факторов, влияющих на время проектирования. В рамках использования в модели разработан классификатор ошибок в технической документации с присвоением весовых коэффициентов, характеризующих степень их критичности и влияния на качество проекта. Определен набор входных параметров, определяющий объем проекта, который отражает масштаб и содержание конкретного проекта. На основе полученных данных разработана структурная схема имитационной модели, включающая шесть функциональных модулей, для каждого из которых описаны задачи, логика функционирования и структура обрабатываемых данных. Предложенная модель-описание служит теоретическим и методологическим фундаментом для последующего построения, моделирующего алгоритма и программной реализации имитационной модели, этапа проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: процессы проектирования; имитационная модель; качество технической документации; показатели эффективности проектной деятельности; железнодорожная автоматика и телемеханика.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-250-263

▼ Введение

Современный этап развития железных дорог характеризуется активной цифровизацией железнодорожной отрасли, охватывающей различные ее области, включая железнодорожную автоматику и телемеханику (ЖАТ). Внедрение цифровых инструментов различного назначения является одним из приоритетных направлений научно-технического развития.

С учетом высокой сложности, большой длительности и многоэтапности жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖЦ СЖАТ) особую актуальность приобретает применение методологии имитационного моделирования (ИМ).

Этот подход используется на различных этапах ЖЦ СЖАТ для решения широкого круга задач. Использование ИМ обеспечивает инструментальную основу для изучения динамики сложных процессов, прогнозирования их развития и оценки эффективности различных вариантов функционирования системы.

Одним из важнейших этапов ЖЦ СЖАТ является проектирование, критически влияющее на дальнейшую надежность и безопасность функционирования СЖАТ в условиях эксплуатации.

Ключевыми свойствами этапа проектирования являются:

- большое количество взаимосвязанных между собой проектных работ;

- сложная координация множества различных участников процесса;
- большое количество стохастических факторов, влияющих на сроки выполнения и качество проектов;
- ограниченные сроки выполнения проектов, установленные договорными обязательствами;
- высокий уровень критичности ошибок при разработке технической документации ТД;
- значительный объем и высокая интенсивность ввода в эксплуатацию новых объектов ЖАТ;
- большое разнообразие проектируемых систем и устройств ЖАТ, сопровождающееся высокой трудоемкостью и сложностью выполнения проектов.

Вышеописанные свойства являются обоснованием применения методологии ИМ для исследования этапа проектирования СЖАТ.

В соответствии с технологией ИМ СЖАТ [1] основными этапами синтеза ИМ являются: модель-описание (МО), формализованная схема объекта моделирования, моделирующий алгоритм, выбор инструментального средства и синтез моделирующей программы.

Целью данного исследования является формирование МО этапа проектирования СЖАТ, определяющей содержательную часть разрабатываемой ИМ и отвечающей требованиям полноты и корректности базовой информации, которая обеспечивает естественный переход к формализованной схеме и далее к моделирующей программе.

Для достижения данной цели в рамках исследования необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать цель и определить задачи моделирования;
- определить требования, предъявляемые к имитационной модели;
- обосновать и определить целевые критерии эффективности процесса проектирования;
- установить границы применимости и допущения, положенные в основу моделируемого процесса;
- разработать структурную схему имитационной модели, отражающие ее функциональные блоки и их взаимодействие;
- описать логику функционирования модулей модели, включая состав данных, а также алгоритмы их взаимодействия.

Вопросам применения ИМ в области систем железнодорожной автоматики и телемеханики посвящено большое количество научной литературы. В исследовании [1] обосновано применение метода ИМ и математической схемы массового обслуживания для этапов ЖЦ СЖАТ, кроме того, описаны свойства информации, получаемые в результате моделирования.

ИМ активно применяется для решения различных задач в железнодорожной отрасли, включая:

- имитаторы для доказательства корректности и безопасности функционирования устройств и систем ЖАТ [2, 3];
- тренажеры различного назначения;
- автоматизированные обучающие комплексы;
- модели оценки эффективности технических и технологических решений.

Для решения данных задач в различных предметных областях разработан целый ряд ИМ, например:

- модель функционирования рельсовых цепей [4, 5];
- модель процессов электронного документооборота ТД [6–8];
- модель оценки времени поиска неисправностей [9];
- модель анализа и оптимизации обслуживания пассажиропотоков в метрополитене [10];
- модель работы инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях чрезвычайных ситуаций с учетом применения инвентарных комплектов [11];
- модель работы предприятия промышленного железнодорожного транспорта [12].

Представленные исследования подтверждают высокую адаптивность и универсальность ИМ как эффективного инструмента анализа сложных технических и организационно-технологических комплексов в области СЖАТ.

1. Определение цели моделирования, допущений и целевых критериев эффективности ИМ этапа проектирования СЖАТ

Целью моделирования является определение и анализ показателей эффективности этапа проектирования СЖАТ на основе заданных параметров проекта и воздействия

стохастических факторов с последующим формированием рекомендаций по оптимизации процесса проектирования.

С целью реализации имитационной модели были приняты следующие допущения:

- в модели рассматриваются только основные проектные работы, регламентированные нормативно-технической документацией по составу проектной и рабочей документации, и не рассматриваются специфические, нестандартизированные виды работ;
- время выполнения проектных работ задается как детерминированная величина на основе нормативов трудозатрат и экспертных оценок с корректировкой путем применения поправочных коэффициентов, отражающих влияние стохастических факторов, воздействующих на процесс проектирования;
- взаимодействие проектного института с внешними участниками выполняется без детализации их внутренних процессов.

Для построения адекватной ИМ этапа проектирования СЖАТ требуется предварительный анализ и структурная декомпозиция основных процессов проектирования СЖАТ.

Главной целью этапа проектирования является разработка ТД, соответствующей требованиям нормативно-технической документации на конкретный объект с наилучшим качеством, обеспечивающим безопасную эксплуатацию СЖАТ на последующих стадиях жизненного цикла и в установленные договорные сроки. Исходя из этого, любые отклонения от требований по качеству и срокам проектирования следует рассматривать как проблемы этапа проектирования СЖАТ.

Анализ практики реализации проектов позволяет выделить следующие проблемы:

- низкий уровень качества выпускаемой ТД;
- большой срок реализации проектов ЖАТ.

Исходя из этого, логичным в данном исследовании будет рассмотрение двух целевых критериев, определяющих эффективность проектной деятельности:

- $T_{пр}$ — время проектирования, критерий, определяющий временные трудозатраты на выполнение полного цикла разработки проектной или рабочей документации;

- $K_{тд}$ — качество ТД, критерий, который отражает точность, полноту и соответствие ТД требованиям нормативной документации. Данный критерий критически влияет на дальнейшую безопасную и надежную работу устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на дальнейших этапах ЖЦ СЖАТ, кроме того, оказывает обратное влияние на время проектирования, так как ошибки в ТД требуют дополнительных итераций проектирования и согласования.

Представленные целевые критерии являются показателями эффективности проектной деятельности, поскольку характеризуют достижение проектных целей по срокам и качеству.

2. Причинно-следственный анализ факторов и параметризация входных данных модели

Для системного представления и анализа причин, влияющих на возникновение вышеописанных проблем, целесообразно применение метода причинно-следственного анализа в виде диаграммы, иллюстрирующей факторы, влияющие на время проектирования [13] и качество технической документации, представленной на рис. 1.

Особое внимание в диаграмме уделяется взаимосвязи этих факторов: низкое качество ТД, характеризующееся ошибками в ТД, приводит к возвратам на доработку, следовательно, к увеличению сроков проектирования.

Для обеспечения адаптивности модели к условиям конкретного проекта необходимо формирование входных параметров, задаваемых пользователем и отражающих его специфику.

Параметры формализуются следующим образом:

$$V_{пр} = \{S, Q_{ст}, T_{ст}, N_{стр}, Q_{пер}, T_{пер}, L_{пер}\},$$

где S — стадия проектирования;

$Q_{ст}$ — количество проектируемых станций;

$T_{ст}$ — тип проектируемой станционной системы;

$N_{стр}$ — количество проектируемых стрелочных переводов;



Рис. 1. Диаграмма факторов влияния на время проектирования

$Q_{пер}$ — количество проектируемых перегонов;

$T_{пер}$ — тип проектируемой перегонной системы;

$L_{пер}$ — длина проектируемого перегона.

Данные параметры позволяют обеспечить адаптацию модели под различные проектные сценарии.

3. Определение границ и функциональных требований ИМ

Границы ИМ определяются фокусом целей исследования на этапе проектирования СЖАТ, включающем два основных процесса:

- 1) разработка ТД на стадии проектной документации;
- 2) разработка ТД на стадии рабочей документации.

Указанные процессы формируют основу структуры проектной деятельности, охватывая полный цикл внутренних проектных работ по разработке ТД. На рис. 2 представлена обобщенная структура этапа проектирования. В данной схеме систематизированы и сгруппированы основные виды проектных работ, характерных для каждой стадии.

Состав проектных работ определяется индивидуально в зависимости от объема проекта, поэтому некоторые виды работ могут не

выполняться при отсутствии необходимости в их применении в рамках конкретного проекта.

Установленные цели этапа проектирования, выделенные ключевые процессы, а также параметры и целевые переменные, влияющие на эффективность проектной деятельности, создают основу для построения имитационной модели этапа проектирования СЖАТ.

Проведенный системный анализ позволяет сформировать функциональные требования к имитационной модели:

- реализация возможности задания проектов с различными параметрами;
- прогнозирование времени выполнения проекта;
- генерация ошибок в ТД и имитация их влияния на процесс проектирования;
- оценка эффективности процесса проектирования;
- формирование рекомендаций по оптимизации времени проектирования путем изменения конфигурации проектной группы, структуры процессов;
- получение аналитической информации о распределении и загруженности ресурсов;
- получение аналитической информации о времени выполнения проектных работ, задержках;
- оценка влияния качества технической документации на время проектирования;



Рис. 2. Структура этапа проектирования СЖАТ

- представление графической информации о процессе проектирования;
- реализация возможности изменения архитектуры модели и наполнения функций модулей.

4. Структурно-функциональная организация ИМ

Для дальнейшего формирования МО выполняется разработка структурной схемы модели, в которой отражены функциональные блоки имитационной модели. Структурная

схема, отражающая логику функционирования модели, представлена на рис. 3.

Представленная схема включает 6 основных модулей:

1. Модуль параметризации проектов

Модуль ввода параметров предназначен для формирования исходных данных ИМ, необходимых для проведения различных имитационных сценариев. Основное назначение — задание характеристик моделируемых проектов.

В качестве исходных данных для модуля параметризации выступают следующие параметры:



Рис. 3. Структурная схема модели процессов проектирования СЖАТ

- количество моделируемых проектов P ;
- стадия проектирования S ;
- количество проектируемых станций $Q_{ст}$;
- проектируемая станционная система $T_{ст}$;
- количество стрелочных переводов $N_{стр}$;
- количество проектируемых перегонов $Q_{пер}$;
- проектируемая перегонная система $T_{пер}$;
- длина проектируемого перегона $L_{пер}$.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Ввод и инициализация параметров

Пользователь осуществляет ввод параметров, которые проходят проверку на корректность и формируют входные данные для модели.

Шаг 2. Маршрутизация проекта в модели

На основе введенных параметров проекта выполняется выбор и запуск соответствующего алгоритма проектирования, формирующего маршрут проекта в рамках ИМ.

Логика маршрутизации включает в себя:

- 1) анализ стадии проектирования, определяющий состав и последовательность выполняемых проектных работ;
- 2) выбор типа проектируемого объекта — станция или перегон;
- 3) выбор типа проектируемой системы.

Шаг 3. Определение маршрута проекта

В зависимости от заданных параметров формируется индивидуальная маршрутная карта процесса проектирования, которая

используется для запуска имитационного эксперимента.

2. Модуль имитации процесса проектирования

Модуль имитации процесса проектирования предназначен для воспроизведения последовательности выполнения проекта с учетом заданных характеристик и логики его выполнения.

Для определения последовательности проектных работ предлагается применение методологии представления бизнес-процессов с использованием нотации $BPMN^1$ [14–16], которая позволит визуализировать основные процессы разработки ТД при задании различных конфигураций проектов, а также определить ключевые события, применяемые документы и участники.

Массив данных для реализации модуля имитации процесса проектирования представлен в табл. 1.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Получение входных данных

Модуль получает входные данные из модуля параметризации проектов и формирует полный состав проектных работ для каждого объекта проектирования.

Шаг 2. Формирование списка выполняемых этапов проекта

¹ BPMN (Business Process Model and Notation) — нотация моделирования бизнес-процессов.

Таблица 1. Массив данных модуля имитации процесса проектирования

| Параметр | Обозначение | Принимаемые значения, источник получения информации |
|------------------------------------|--------------------------|---|
| Идентификатор этапа | $ID_{\text{этапа}}$ | |
| Нормативное время выполнения этапа | $t_{\text{н.этапа}}$ | Нормативы трудозатрат на выполнение проектных работ |
| Идентификатор этапа-последователя | $ID_{\text{след.этапа}}$ | |
| Необходимость выполнения этапа | $I_{\text{этапа}}$ | 0 — не выполняется |
| | | 1 — выполняется |
| Тип выполняемого этапа | $T_{\text{д}}$ | Разработка текстовых документов |
| | | Разработка эксплуатационных чертежей |
| | | Разработка принципиальных схем |
| | | Разработка монтажных схем |
| | | Разработка схем аппаратов управления |
| | | Разработка программного обеспечения |
| | | Работы, не связанные с разработкой чертежей |

Таблица 2. Массив данных модуля имитации ошибок в ТД

| Параметр | Обозначение | Принимаемые значения, источник получения информации |
|---|----------------------|---|
| Общее количество ошибок | N_o | Натуральное число, вводится пользователем |
| Вероятность возникновения ошибки в текстовом документе | $P_{\text{о.тек.д}}$ | от 0 до 1, вводится пользователем |
| Вероятность возникновения ошибки в эксплуатационных чертежах | $P_{\text{о.экс}}$ | от 0 до 1, вводится пользователем |
| Вероятность возникновения ошибки в принципиальных схемах | $P_{\text{о.пс}}$ | от 0 до 1, вводится пользователем |
| Вероятность возникновения ошибки в монтажных схемах | $P_{\text{о.мс}}$ | от 0 до 1, вводится пользователем |
| Вероятность возникновения ошибки в схемах аппарата управления | $P_{\text{о.сау}}$ | от 0 до 1, вводится пользователем |
| Вероятность ошибки в программном обеспечении | $P_{\text{о.по}}$ | от 0 до 1, вводится пользователем |

Исходя из технического задания на проектирование включаются или исключаются выполняемые проектные работы. Для каждого объекта проектирования определяются:

- текущий этап;
- временные нормативные значения трудозатрат текущего этапа;
- следующий этап;
- признак выполнения этапа $I_{\text{этапа}} = 1$ или 0 ;
- тип выполняемого этапа.

Шаг 3. Инициализация имитационного эксперимента

Модуль запускает выполнение проектных этапов в соответствии с логической последовательностью и с учетом времени их выполнения.

3. Модуль имитации ошибок в ТД

Модуль имитации ошибок предназначен для генерации и моделирования воздействия

ошибок на процесс проектирования. Его цель — учет вероятностной природы возникновения ошибок, их влияние на качество ТД и время проектирования.

Массив данных модуля имитации ошибок в ТД представлен в табл. 2.

В рамках построения модуля имитации ошибок в ТД был разработан упрощенный классификатор, основанный на параллельном подходе к кодированию характеристик ошибок. Данный подход обеспечивает однозначность описания каждой ошибки, необходимой для решения целей моделирования и расчетной процедуры оценки качества ТД.

Классификация возможных ошибок в ТД представлена на рис. 4.

В процессе разработки была учтена существующая классификация ошибок ТД, пред-

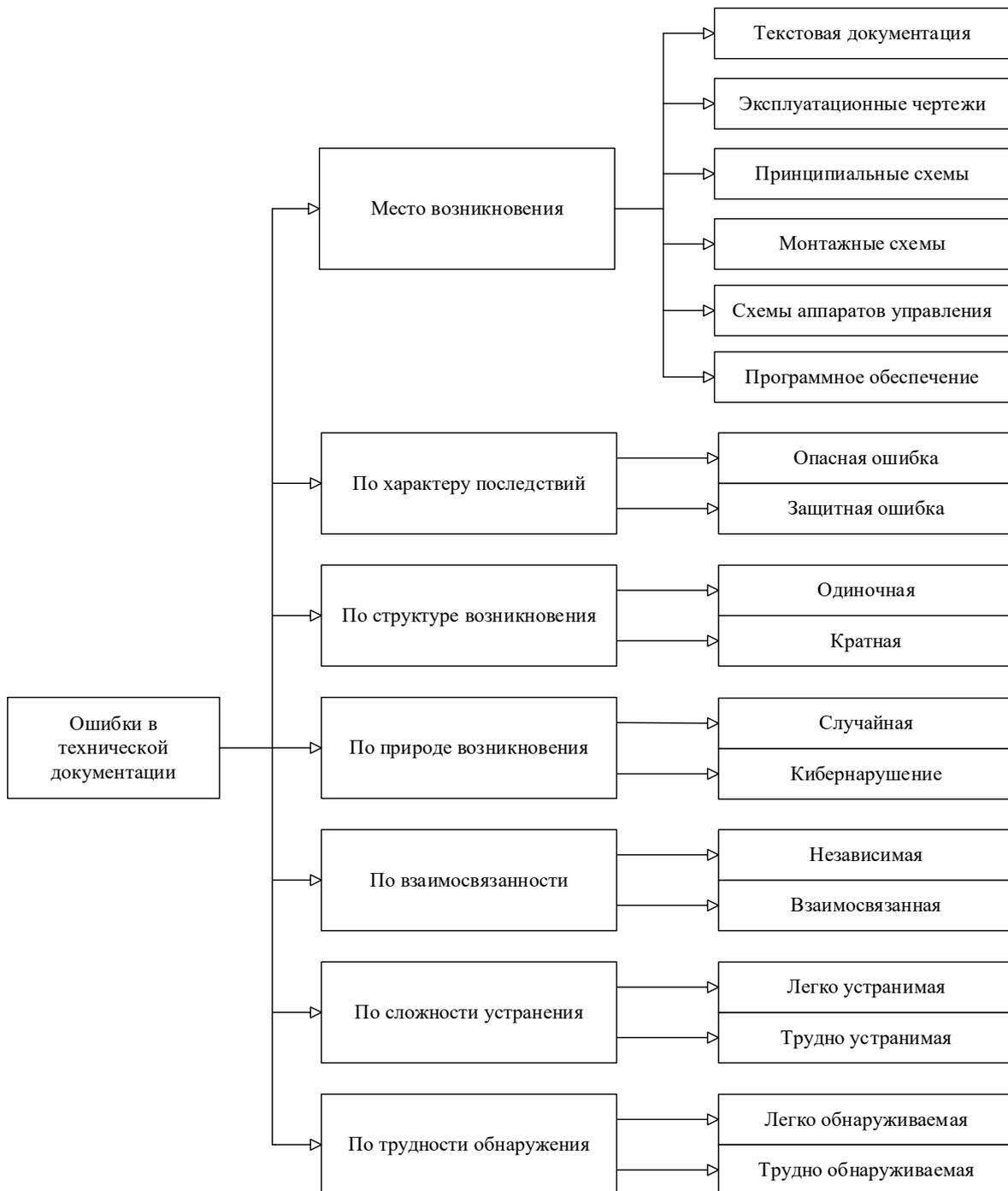


Рис. 4. Классификация ошибок в ТД

ставленная в работе [17], где рассматривается детализованный подход к систематизации ошибок.

Предложенный в данном модуле подход основан на ряде принципов, заимствованных из указанного источника, однако он был адаптирован под задачи автоматической генерации ошибок в модели и анализа их влияния на продолжительность проектирования.

Код ошибки формируется на основе семи характеристик, каждая из которых кодируется в виде однозначного цифрового значения. Признаки располагаются строго по установленному порядку, отражая свойства ошибок.

Структура кода ошибки строится на следующих принципах, представленных в табл. 3.

Каждая ошибка e_i в ТД описывается семью признаками по:

Таблица 3. Структура и весовая оценка характеристик ошибки

| Характеристика | Кодовая позиция | Значение | Вес ошибки |
|----------------------------|-----------------|--------------------------------|------------|
| Место возникновения | A | 1 — текстовая документация | - |
| | | 2 — эксплуатационные чертежи | |
| | | 3 — принципиальные схемы | |
| | | 4 — монтажные схемы | |
| | | 5 — схемы аппаратов управления | |
| | | 6 — программное обеспечение | |
| По характеру последствий | B | 1 — опасная ошибка | 1,0 |
| | | 2 — защитная ошибка | 0,3 |
| По структуре возникновения | C | 1 — одиночная ошибка | 0,5 |
| | | 2 — кратная ошибка | 1,0 |
| По природе возникновения | D | 1 — случайная | 0,4 |
| | | 2 — кибернарушение | 1,0 |
| По взаимосвязанности | F | 1 — независимая | 0,5 |
| | | 2 — взаимосвязанная | 1,0 |
| По сложности устранения | E | 1 — легко устранимая | 0,4 |
| | | 2 — трудно устранимая | 1,0 |
| По трудности обнаружения | G | 1 — легко обнаруживаемая | 0,3 |
| | | 2 — трудно обнаруживаемая | 1,0 |

$$e_i = \{A, B, C, D, F, E, G\},$$

где *A* — тип документа, в котором зафиксирована ошибка;

B — характер последствий;

C — структура возникновения;

D — природа возникновения;

F — взаимосвязанность;

E — сложность устранения;

G — трудность обнаружения.

Для каждой ошибки *e_i* рассчитывается ее вес *k_i*, определяющий влияние на качество технического документа:

$$k_i = \omega_B(B) + \omega_C(C) + \omega_D(D) + \omega_F(F) + \omega_E(E) + \omega_G(G),$$

где $\omega_B(B)$ — вес признака *B* при значении *B* (далее по аналогии).

После генерации ошибок и присвоения каждой определенного кода производится количественная оценка качества технической документации *K_{тд}*, отражающая влияние на продолжительность проектирования. Расчет выполняется для каждого типа документации, определяемого значением

признака *A*, а также для проекта в целом как среднее значение по всем типам.

Пусть в ТД типа *A = j* содержится *N_j* ошибок. Качество технической документации данного типа обозначается как *K_{тд}^j*, где

$$j \in \{\text{тек.д, экс, пс, мс, сау, по}\},$$

где тек.д — текстовая документация;

экс — эксплуатационные чертежи;

пс — принципиальные схемы;

мс — монтажные схемы;

сау — схемы аппаратов управления;

по — программное обеспечение,

и рассчитывается по формуле:

$$K_{тд}^j = 1 - \frac{\sum_{e \in j} k_i}{N_j k_{\max}},$$

где *N_j* — количество ошибок в ТД данного типа;

k_i — вес ошибки *i*, рассчитанный по признакам *B–G*;

k_{max} = 6,0 — максимально возможный вес одной ошибки.

Таблица 4. Массив данных модуля имитации влияния стохастических факторов

| Параметр | Обозначение | Принимаемые значения, источник получения информации |
|--|------------------|---|
| Коэффициент влияния полноты исходных данных | $k_{\text{пи}}$ | $1,0 \leq k_{\text{пи}} \leq 1,25$ |
| Коэффициент влияния качества исходных данных | $k_{\text{ки}}$ | $1,0 \leq k_{\text{пи}} \leq 1,15$ |
| Коэффициент влияния изменений в смежных разделах | $k_{\text{изм}}$ | $1,0 \leq k_{\text{изм}} \leq 1,15$ |
| Коэффициент влияния участия сторонних организаций | $k_{\text{со}}$ | $1,0 \leq k_{\text{со}} \leq 1,15$ |
| Коэффициент влияния болезней и нетрудоспособности сотрудников | $k_{\text{б}}$ | $1,0 \leq k_{\text{б}} \leq 1,08$ |
| Коэффициент влияния структуры и эффективности управления проектом | $k_{\text{стр}}$ | $1,0 \leq k_{\text{стр}} \leq 1,21$ |
| Коэффициент влияния изменений в нормативной документации | $k_{\text{инд}}$ | $1,0 \leq k_{\text{инд}} \leq 1,15$ |
| Коэффициент влияния отработки замечаний с заводом-изготовителем и заказчиком | $k_{\text{от}}$ | $1,0 \leq k_{\text{от}} \leq 1,06$ |
| Коэффициент влияния недоступности требуемого оборудования или материалов | $k_{\text{ном}}$ | $1,0 \leq k_{\text{ном}} \leq 1,13$ |
| Коэффициент влияния изменения требований заказчика | $k_{\text{итз}}$ | $1,0 \leq k_{\text{итз}} \leq 1,16$ |

Итоговая оценка качества проекта определяется как среднее арифметическое значение качества по всем типам технической документации. Общая оценка качества технической документации определяется как:

$$K_{\text{тд}} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^A K_{\text{тд}}^j.$$

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Задание параметров модуля

Пользователь задает количество ошибок, которые возникнут в технической документации, а также вероятность их возникновения в различных типах документации.

Шаг 2. Генерация ошибок в технической документации

Модуль случайным образом генерирует ошибки, которым присваивается тип документа и другие признаки, формируя код ошибки, после чего для нее рассчитывается вес по признакам $B-G$. Затем производится группировка ошибок по типу документации (признак A), и для каждой рассчитывается количественное значение качества технической документации данного типа.

Шаг 3. Учет влияния качества ТД на процесс проектирования

На основе рассчитанных значений качества ТД, которые передаются в модуль имитации процесса проектирования для учета возвратов на доработку ТД и, как следствие, увеличения

времени проектирования. Таким образом, результаты модуля имитации ошибок в ТД оказывают непосредственное влияние на моделируемый процесс проектирования, отражая зависимость качества ТД от времени проектирования.

4. Модуль имитации влияния стохастических факторов

Модуль имитации влияния стохастических факторов предназначен для учета неопределенностей и внешних воздействий, оказывающих влияние на целевые переменные процесса проектирования. Главной целью модуля является моделирование влияния процессных, организационных и внешних факторов на продолжительность выполнения проектных работ.

Воздействие факторов осуществляется через систему коэффициентов, отражающих степень воздействия параметра. Перечень факторов был сформирован в рамках работы [13].

Массив данных модуля имитации влияния стохастических факторов представлен в табл. 4.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Инициализация параметров

Пользователь имеет возможность задания вручную коэффициентов стохастических факторов, если известны конкретные условия проекта, либо генерации параметров случайным образом на основе вероятностных распределений.

Шаг 2. Импорт в модуль имитации процесса проектирования

Таблица 5. Массив данных модуля регулирования ресурсов

| Параметр | Обозначение | Принимаемые значения, источник получения информации |
|--|-------------|---|
| Количество инженеров-проектировщиков | $N_{инж}$ | Натуральное число |
| Уровень квалификации инженера-проектировщика | $k_{инж}$ | Высокий уровень квалификации ($k_{инж} = 0,8$) |
| | | Средний уровень квалификации ($k_{инж} = 1,0$) |
| | | Низкий уровень квалификации ($k_{инж} = 1,2$) |
| Специализация по типу документации | T_d | Разработка текстовых документов |
| | | Разработка эксплуатационных чертежей |
| | | Разработка принципиальных схем |
| | | Разработка монтажных схем |
| | | Разработка схем аппаратов управления |
| | | Разработка программного обеспечения |
| | | Работы, не связанные с разработкой чертежей |

Сформированные коэффициенты передаются в модуль имитации процесса проектирования, где масштабируют время выполнения проектных работ, отражая влияние неблагоприятных условий и отклонений.

5. Модуль регулирования ресурсов

Модуль регулирования ресурсов предназначен для имитации участия инженеров-проектировщиков в процесс проектирования с учетом их квалификации, специализации и вероятности заболевания и недоступности.

Массив данных модуля регулирования ресурсов представлен в табл. 5.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Формирование состава проектной группы и заполнение ее параметров

Пользователь формирует состав проектной группы, указывая общее количество инженеров-проектировщиков, задавая для каждого:

- уровень квалификации;
- специализацию по типу документации.

Шаг 2. Распределение инженеров-проектировщиков по проектным работам

В зависимости от заданных характеристик осуществляется распределение инженеров по проектным работам.

Распределение осуществляется по следующим принципам:

- наименьшая загруженность;
- соответствие специализации конкретному типу документации;
- наибольшая квалификация;
- доступность.

Представленная логика обеспечивает рациональное использование кадровых ресурсов, что способствует снижению времени проектирования.

Шаг 3. Влияние на процесс проектирования

После формирования распределения инженеров-проектировщиков по проектным работам производится учет влияния их квалификации на продолжительность выполнения конкретной работы.

6. Модуль анализа результатов процесса проектирования

Модуль анализа результатов проектирования предназначен для формирования сводной аналитической информации по итогам имитационного моделирования. Основной функцией модуля является обработка данных от других модулей, расчет и анализ статистической информации.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Сбор данных с модулей

Получение промежуточных значений от модулей.

Шаг 2. Расчет основных показателей этапа проектирования:

Полученные данные позволяют рассчитать следующие показатели:

- общее время проектирования, согласно целевой функции [13];
- время выполнения отдельных проектных работ с учетом поправочных коэффициентов;
- значение качества ТД проекта;

- качество ТД по отдельным типам документации;
- общее количество сгенерированных ошибок;
- распределение ошибок по типам документации;
- количество возвратов ТД на доработку;
- суммарная и индивидуальная загруженность инженеров-проектировщиков;
- задержки при выполнении проекта.

Шаг 3. Формирование отчета

Осуществляется сбор всех рассчитанных показателей в структурированный аналитический отчет, подготовка данных для построения графиков.

Заключение

Проведенное исследование, направленное на формирование МО этапа проектирования СЖАТ, позволило рассмотреть процесс проектирования как систему, чувствительную к влиянию множества взаимосвязанных стохастических факторов.

В ходе исследования была выполнена систематизация основных процессов проектирования, выполнена структурная декомпозиция, что позволило зафиксировать наиболее значимые компоненты и зависимости, подлежащие последующему моделированию. Особое внимание было уделено факторам, которые в реальной практике чаще всего оказываются неформализованными, но значительно влияют на результат проектной деятельности. Так, влияние ошибок в ТД на возвраты на доработку требуют моделирования причинно-следственных связей, не поддающихся аналитическому учету в рамках традиционных подходов. Именно поэтому ИМ выступает как необходимый инструмент, позволяющий учитывать вариативность, неоднородность и вероятностный характер таких воздействий.

Сформированная МО адаптирована под различные условия проектирования. Однако в процессе разработки были осознанно приняты упрощения, ограничивающие уровень детализации. Это обусловлено необходимостью построения модели минимально необходимой сложности, достаточной для решения исследуемых задач, но не перегруженной излишними переменными.

Практическим результатом исследования стала разработка модульной структуры модели, в основе которой лежит разделение функций между шестью логически обособленными, но влияющими на работу друг на друга модулями. Данная структура обеспечивает гибкость ее архитектуры, возможность пошагового наращивания ее функциональности, адаптацию под конкретные условия и сценарии имитационного эксперимента.

Таким образом, поставленные цель и задачи исследования были достигнуты. Исследование позволило зафиксировать и формализовать сложные связи, оказывающие влияние на эффективность проектной деятельности, и создать основу, которая обеспечит переход от описательной постановки задачи к разработке моделирующего алгоритма и программной реализацией ИМ. ▲

Список источников

1. Константинова Т. Ю. Технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Т. Ю. Константинова, А. А. Лыков, Д. С. Марков и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 2. — С. 193–204.
2. Горелик А. В. Применение имитационного моделирования при проектировании и оценке надежности систем железнодорожной автоматики / А. В. Горелик, А. С. Веселова, А. А. Маслов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». — 2016. — Т. 2. — С. 246–248.
3. Марков Д. С. Инструментальное средство оценки вероятностных показателей надежности и безопасности систем железнодорожной автоматики / Д. С. Марков, О. А. Наседкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2020. — Т. 17. — № 1. — С. 23–34.
4. Марков Д. С. Формализованная схема процесса имитационного моделирования рельсовой линии / Д. С. Марков, М. Б. Соколов, В. Б. Соколов // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 2. — С. 204–221.
5. Марков Д. С. Метод процессного моделирования рельсовых линий как функциональных блоков рельсовых цепей / Д. С. Марков, В. Б. Соколов, М. Б. Соколов // Вестник транспорта Поволжья. — 2020. — № 1(79). — С. 59–70.
6. Булавский П. Е. Методика оценки временных характеристик процессов электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2. — № 1. — С. 81–94.
7. Булавский П. Е. Формализация процессов электронного документооборота технической документации с помощью сетей Петри / П. Е. Булавский, О. К. Ваисов // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4. — № 4. — С. 687–705.

8. Булавский П. Е. Концептуальная модель электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский // Транспорт Российской Федерации. — 2011. — № 1(32). — С. 60–63.
9. Булавский П. Е. Моделирование и оценка времени поиска неисправностей в системах интервального регулирования движения поездов на базе иерархических цветных сетей Петри / П. Е. Булавский, О. К. Ваисов // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 3. — С. 356–376.
10. Василенко М. Н. Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков в метрополитене / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, В. Б. Соколов и др. // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2003. — С. 17–25.
11. Яшин М. Г. Моделирование работы инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях чрезвычайных ситуаций с учетом применения инвентарных комплектов / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев, И. В. Кушпиль, Н. Н. Фомин // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 4. — С. 354–366.
12. Сорочкина И. С. Методы системного анализа и имитационного моделирования в работе предприятий промышленного железнодорожного транспорта / И. С. Сорочкина, О. Н. Числов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2014. — № 2. — С. 115–120.
13. Набоков А. С. Анализ и моделирование процессов проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. С. Набоков, П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. — 2025. — Т. 11. — № 2. — С. 164–177.
14. Chinosi M. BPMN: An introduction to the standard / M. Chinosi, A. Trombetta // Computer Standards & Interfaces. — 2012. — Vol. 34. — Iss. 1. — Pp. 124–134.
15. Alves F. BPMN and Petri Nets: A Case Study of Process Optimization in a Project Engineering Company / F. Alves, R. D. Merlim, L. M. Carvalho, F. H. B. de Souza // 7th International Conference on Applied Research in Management, Economics and Accounting. — Dublin, 2023.
16. Business Process Re-Engineering using BPMN: A Case Study // International Journal of Business Management and Visuals. — 2024. — Vol. 7. — Iss. 1. — Pp. 49–55.
17. Тележенко Т. А. Разработка классификатора ошибок технической документации на устройства СЦБ / Т. А. Тележенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2009. — № 2(34). — С. 50–55.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 3, pp. 250–263
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-250-263

A Comprehensive Model for Railway Automation and Remote Control Systems Design Processes

Information about authors

Nabokov A. S., Postgraduate Student. E-mail: t3man8@yandex.ru

Bulavsky P. E., Doctor in Engineering, Professor. E-mail: bulavskiy@pgups.ru

Markov D. S., PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: MDS1945@yandex.ru

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Department of Automation and Remote Control on Railways, St. Petersburg

Abstract: The article presents a model describing the design stage of a railway automation and remote control system for the subsequent construction of a simulation model for analysis, forecasting results, and improving the efficiency of project implementation. Within the context of the model description, the purpose of modelling is defined, the functional requirements are formulated, and the boundaries and assumptions are described. A system analysis of the design stage was performed, and the design stage was broken down into key processes and design steps. The objectives and key performance indicators for design activities were identified, as well as the main issues related to the project duration and the quality of technical documentation presented. A diagram was constructed to illustrate the factors affecting the design time, using the cause-and-effect analysis method as a basis. The development of a classifier of errors in technical documentation within the model frame involved the assignment of weighting coefficients to characterize their degree of criticality and impact on the project quality. A set of input parameters was defined to reflect the scope of the project, determining the volume and content of a specific project. Following a thorough analysis of the data, a structural diagram of the simulation model has been developed. The system is composed of six functional modules, each with a detailed description of their respective tasks, logic of operation, and structure of the processed data. The proposed model can provide a theoretical and methodological

foundation for the construction phase of a modulating algorithm and the subsequent software implementation of a simulation model. In addition, it can support the design stage of railway automation and remote control systems.

Keywords: design processes; simulation model; technical documentation quality; performance indicators of design activities; railway automation and remote control systems.

References

1. Konstantinova T. Yu., Lykov A. A., Markov D. S. et al. Tekhnologiya imitatsionnogo modelirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Simulation modeling technology of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 2, pp. 193–204. (In Russian)
2. Gorelik A. V., Veselova A. S., Maslov A. A. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya pri proektirovani i otsenke nadezhnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Application of simulation modeling in the design and reliability assessment of railway automation systems]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"]. 2016, vol. 2, pp. 246–248. (In Russian)
3. Markov D. S., Nasedkin O. A. Instrumental'noe sredstvo otsenki veroyatnostnykh pokazateley nadezhnosti i bezopasnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Instrumental tool for assessing probabilistic indicators of reliability and safety of railway automation systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2020, vol. 17, Iss. 1, pp. 23–34. (In Russian)
4. Markov D. S., Sokolov M. B., Sokolov V. B. Formalizovannaya skhema protsessa imitatsionnogo modelirovaniya rel'sovoy linii [Formalized scheme of rail line simulation modeling process]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2020, vol. 6, Iss. 2, pp. 204–221. (In Russian)
5. Markov D. S., Sokolov V. B., Sokolov M. B. Metod protsessnogo modelirovaniya rel'sovykh liniy kak funktsional'nykh blokov rel'sovykh tseyey [Method of process modeling of rail lines as functional blocks of track circuits]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Volga Transport Herald]. 2020, Iss. 1(79), pp. 59–70. (In Russian)

6. Bulavskiy P. E., Markov D. S. Metodika otsenki vremennykh kharakteristik protsessov elektronnoy dokumentooboroty tekhnicheskoy dokumentatsii [Methodology for assessing time characteristics of electronic document management processes of technical documentation]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2016, vol. 2, Iss. 1, pp. 81–94. (In Russian)
7. Bulavskiy P. E., Vaisov O. K. Formalizatsiya protsessov elektronnoy dokumentooboroty tekhnicheskoy dokumentatsii s pomoshch'yu setey Petri [Formalization of electronic document management processes of technical documentation using Petri nets]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2018, vol. 4, Iss. 4, pp. 687–705. (In Russian)
8. Bulavskiy P. E. Kontseptual'naya model' elektronnoy dokumentooboroty tekhnicheskoy dokumentatsii [Conceptual model of electronic document management of technical documentation]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2011, Iss. 1(32), pp. 60–63. (In Russian)
9. Bulavskiy P. E., Vaisov O. K. Modelirovaniye i otsenka vremeni poiska neispravnostey v sistemakh interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na baze ierarkhicheskikh tsvetnykh setey Petri [Modeling and assessment of fault detection time in train interval control systems based on hierarchical colored Petri nets]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2020, vol. 6, Iss. 3, pp. 356–376. (In Russian)
10. Vasilenko M. N., Markov D. S., Sokolov V. B. et al. Imitatsionnaya model' obsluzhivaniya passazhiropotokov v metropolitene [Simulation model of passenger flow service in the metro]. *Konstruirovaniye, sertifikatsiya i tekhnicheskaya ekspluatatsiya ustroystv i sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Design, certification and technical operation of railway automation and remote control devices and systems]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2003, pp. 17–25. (In Russian)
11. Yashin M. G., Pantelev R. A., Kushpil' I. V., Fomin N. N. Modelirovaniye raboty infrastruktury zheleznodorozhnoy transporta v usloviyakh chrezvychaynykh situatsiy s uchedom primeneniya inventarnykh komplektov [Modeling of railway transport infrastructure operation in emergency situations taking into account the use of inventory sets]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, vol. 8, Iss. 4, pp. 354–366. (In Russian)
12. Sorochkina I. S., Chislov O. N. Metody sistemnogo analiza i imitatsionnogo modelirovaniya v rabote predpriyatiy promyshlennogo zheleznodorozhnoy transporta [Methods of system analysis and simulation modeling in the work of industrial railway transport enterprises]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Rostov State Transport University]. 2014, Iss. 2, pp. 115–120. (In Russian)
13. Nabokov A. S., Bulavskiy P. E., Markov D. S. Analiz i modelirovaniye protsessov proektirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Analysis and modeling of design processes of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2025, vol. 11, Iss. 2, pp. 164–177. (In Russian)
14. Chinosi M., Trombetta A. BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*. 2012, vol. 34, Iss. 1, pp. 124–134.
15. Alves F., Merlim R. D., Carvalho L. M., de Souza F. H. B. BPMN and Petri Nets: A Case Study of Process Optimization in a Project Engineering Company. 7th International Conference on Applied Research in Management, Economics and Accounting. Dublin, 2023.
16. Business Process Re-Engineering using BPMN: A Case Study. *International Journal of Business Management and Visuals*. 2024, vol. 7, Iss. 1, pp. 49–55.
17. Telezhenko T. A. Razrabotka klassifikatora oshibok tekhnicheskoy dokumentatsii na ustroystva STSB [Development of an error classifier for technical documentation on STSB devices]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2009, Iss. 2(34), pp. 50–55. (In Russian)